

УДК 69.001.5

Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах

Я. В. Мельник¹, А. Э. Федоров²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² ООО СК «Мостотрест», Россия, 236006, Калининград, Правая набережная, 10

Для цитирования: Мельник Я. В., Федоров А. Э. Способ сооружения подводных городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 4. С. 965–972. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-965-972

Аннотация

Цель: поиск рационального способа строительства подводного тоннеля в условиях плотной городской застройки при ширине русла водного препятствия порядка 200 м в несвязанных илистых грунтах, который обеспечит минимальную глубину заложения тоннеля без дополнительных и дорогостоящих мер по укреплению окружающего грунтового массива. Рассмотрен вопрос сооружения пересечений в разных уровнях, строительство которых в последнее время значительно выросло из-за увеличения объемов строительства автомобильных магистралей в рамках расширения транспортной сети городов. **Методы:** проанализированы существующие способы сооружения городских подводных тоннелей в слабых грунтах и выявлено, что ни один из них не является рациональным в данных условиях. Местом исследования выбран перспективный створ реки Преголь в городе Калининграде, строительство тоннеля в этом створе обеспечит не только увеличение пропускной способности магистрали, но и проезд грузовых потоков. **Практическая значимость:** разработана технология поэтапного сооружения подрусовой части подводных тоннелей способом продавливания секций под дном водотока без предварительной разработки грунта, не имеющая аналогов в отечественном тоннелестроении.

Ключевые слова: подводный городской тоннель, илистые грунты, продавливание, опускные секции, рабочий орган

Введение

Развитие транспортной системы Российской Федерации — одно из приоритетных направлений государственной поддержки, не только обеспечивающее жизнедеятельность общества, но и непосредственно влияющее на социально-экономическое развитие и безопасность страны в целом. В крупных городских агломерациях для устойчивого совершенствования транспортной системы требуется ее опережающее развитие относительно других отраслей народного хозяйства. Транспортная система города сегодня

— это разветвленная сеть дорог различного назначения, обеспечивающая бесперебойное, безопасное и эффективное перемещение в пространстве людей и грузов, а также внедрение скоростных, высокопроизводительных и экологически чистых видов транспорта [1].

Рассмотрим вопрос сооружения пересечений в разных уровнях, строительство которых в последнее время значительно увеличилось из-за роста объемов строительства автомобильных магистралей при

расширении транспортной сети городов. Целью исследования был поиск рационального способа строительства подводного тоннеля в условиях плотной городской застройки при ширине русла водного препятствия порядка 200 м в несвязанных илистых грунтах.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Анализ существующих способов строительства подводных тоннелей в слабых грунтах.

2. Разработка технологии строительства городских тоннелей в несвязанных илистых грунтах.

На первом этапе исследования проанализированы различные варианты проходки подводного тоннеля с точки зрения возможных рисков при строительстве в городских условиях.

При горном способе сооружения тоннелей основная сложность будет заключаться в разработке обводненного грунта, требующего специальных мер по обеспечению устойчивости пород в процессе проходки тоннеля. Так, при строительстве совмещенного тоннеля «Адлер — горноклиматический курорт «Альпака Сервис» потребовалось применение дорогостоящих специальных способов закрепления грунтов, обеспечивающих безопасность ведения работ. Применялось несколько способов закрепления грунтов: сооружение опережающего свода из труб, устройство грунтоцементных свай по технологии Jet-Grouting, применение фиброглассовых и самозабуривающихся анкеров [8].

Проектирование поперечного сечения тоннеля с четырьмя полосами движения, сооружаемого горным способом, повлечет за собой значительное увеличение пролета сооружаемой конструкции и, как следствие, снижение устойчивости лба забоя и необходимость зна-

чительного заглубления тоннеля, что, в свою очередь, приводит к трудности расположения рамповых участков в плотной городской застройке [4].

При щитовой проходке для сооружения тоннеля в данных инженерно-геологических условиях необходимо учитывать, что при незначительной длине подрусовой части длина тоннелепроходческого механизированного комплекса с сечением на четыре полосы (диаметром 12–14 м) составляет порядка 200 м. Это приводит к значительным затратам на строительство стартового и приемного котлованов, требующих применения дорогостоящих ограждений. Также потребуется применение специальных щитов с гидро- или бентонитовым пригрузом забоя, обеспечение значительного в заданных инженерно-геологических условиях защитного слоя вышележащих грунтов. Аналогично горному способу возникают сложности в сооружении рамповых участков из-за увеличения глубины и, как следствие, длины тоннеля, а также во встраивании их в уже существующую транспортную сеть города [3, 7].

Применение способа опускных секций в несвязанных глинистых грунтах, обеспечивающего нам минимальную глубину заложения, невозможно без дополнительного крепления грунтов дна водотока либо его частичной замены. Необходимо устройство специального основания, на которое будут опираться секции, чтобы избежать неравномерных осадков в процессе эксплуатации [9]. Кроме того, в процессе устройства подводной траншеи для установки секции необходимо будет частичное укрепление грунтов для обеспечения устойчивости откосов, что влечет за собой большие трудозатраты и увеличение материалоемкости [2].

Анализ существующих способов сооружения подводных тоннелей показывает, что, на наш взгляд, ни один из них не является рациональным в данных геологических условиях, поэтому мы предлагаем разработать новый способ строительства подводных тоннелей, который обеспечит минимальную глубину заложения без дополнительных дорогостоящих мер по укреплению грунтов.

Описание места исследования

Местом исследования выбран створ реки Преголь в городе Калининграде, в районе двухъярусного моста. Он перспективен для строительства автодорожного подводного тоннеля, который продублирует существующее мостовое пересечение и обеспечит не только увеличение пропускной способности магистрали, но и проезд грузовых автомобилей.

Геология участка проектирования представлена отложениями четвертичной системы: техногенные и аллювиальные образования, ледниковые отложения. Грунты, слагающие дно водотока, представляют собой глинистые илы, модуль деформации (E) которых находится в пределах 1–5 МПа. Данные грунты относятся к разновидности «очень сильно деформируемые».

Описание способа продавливания тоннельных секций с использованием направляющих, без предварительной разработки грунта

Разработанный новый способ строительства тоннелей описывается основными этапами, которые необходимо выполнить для сооружения подрусловой части тоннеля.

На первом этапе строительства (рис. 1) устраиваются стартовый и приемный котлованы с установкой шпунтового ограждения, с распорной и обвязочной системой, выполненной из труб и балок соответственно.

На втором этапе устраивается свайное основание, которое будет предотвращать опрокидывание ростверков и уменьшит перемещение основания из труб в процессе эксплуатации.

На третьем этапе строится специальная металлическая стартовая камера (рис. 2), которая впоследствии станет ограждающим элементом котлована и будет обеспечивать защиту от прорыва ила в процессе продавливания секций.

Также на данном этапе производства работ устраивается стапель для бетонирования секции и устройства накаточных путей.

На четвертом этапе строительства проводятся проходческие работы по устройству

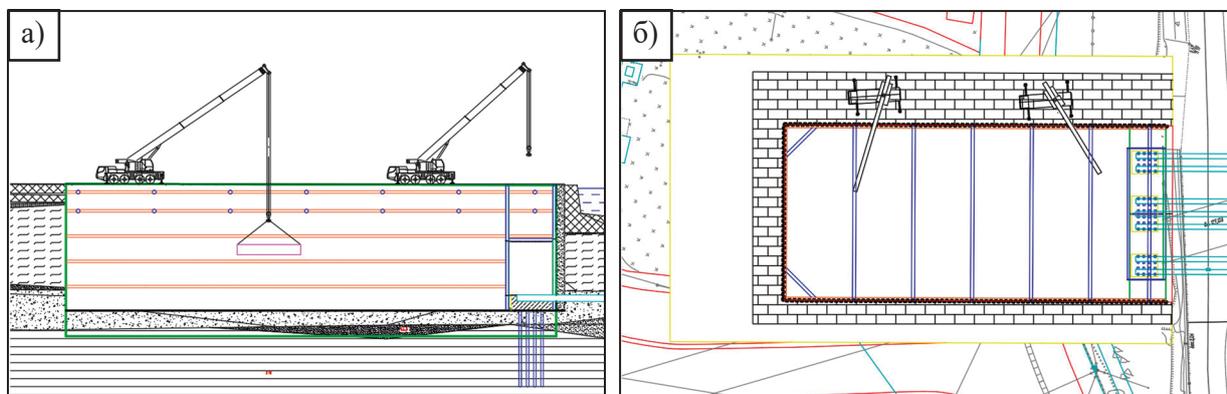


Рис. 1. Первый этап

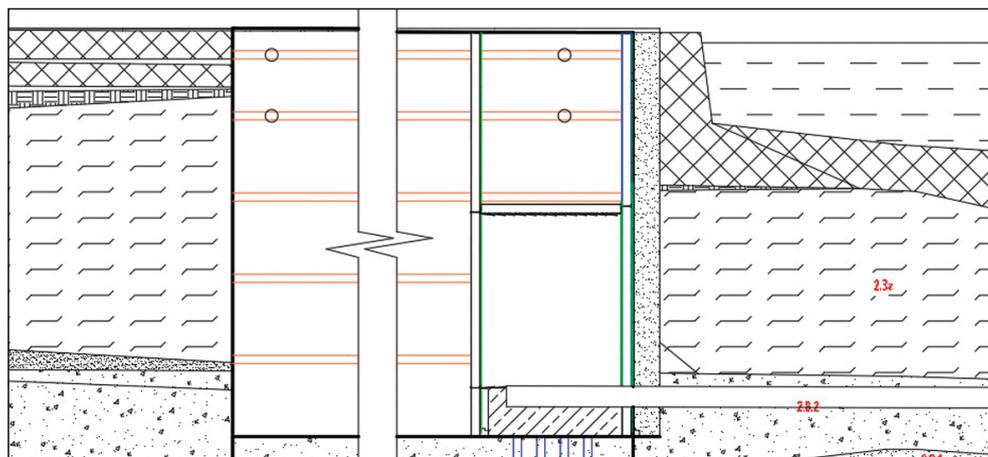


Рис. 2. Устройство стартовой камеры (этап 3)

направляющих из труб при помощи микрошита. После устройства труб необходимо увязать их со свайным основанием, предварительно распушив оголовки свай, которые были установлены на втором этапе, и нарастив арматурный каркас.

На пятом этапе строительства устраиваются железобетонные ростверки, в которые будут заанкериваться трубы. Заанкеривание труб производится таким образом, чтобы часть трубы высотой 100 мм была вне ростверка, для установки продавливаемой секции сразу на них.

На шестом этапе производства работ устраивается герметичная стартовая камера для ведения работ по продавливанию секций. Также внутри данной камеры необходимо устроить многорядные замкнутые резиновые прокладки, которые будут препятствовать проникновению воды и ила в котлован путем плотного облегания секции при ее продавливании.

На седьмом этапе строительства производится установка гидравлических домкратов в проектное положение, а также устройство дополнительного оборудования для их обслуживания. Количество домкратов, которое

необходимо для продавливания секций, определяется расчетом. Домкраты, которые возможно использовать для продавливания, развивают усилие до 1000 т/с (модель домкрата ДГ1000М300).

На восьмом этапе необходимо произвести подготовительные работы для продавливания секции (рис. 3): проверить готовность домкратов и оборудования, закрыть торец секции, проверить работоспособность накаточных путей и их тормозные устройства, а также резиновые прокладки стартовой камеры на наличие дефектов. Кроме того, на подготовительном этапе следует заполнить сервисные отсеки внутри секции балластом для обеспечения отрицательной плавучести конструкции.

После продавливания первой секции на стапеле бетонируется вторая секция, повторяя пятый этап. Когда вторая секция будет подготовлена к продавливанию, необходимо ее переместить к первой секции так, чтобы расстояние между ними было 50–60 см, и устроить стыковочный шов для обеспечения герметичности и целостности в процессе эксплуатации тоннельного пересечения (рис. 4).

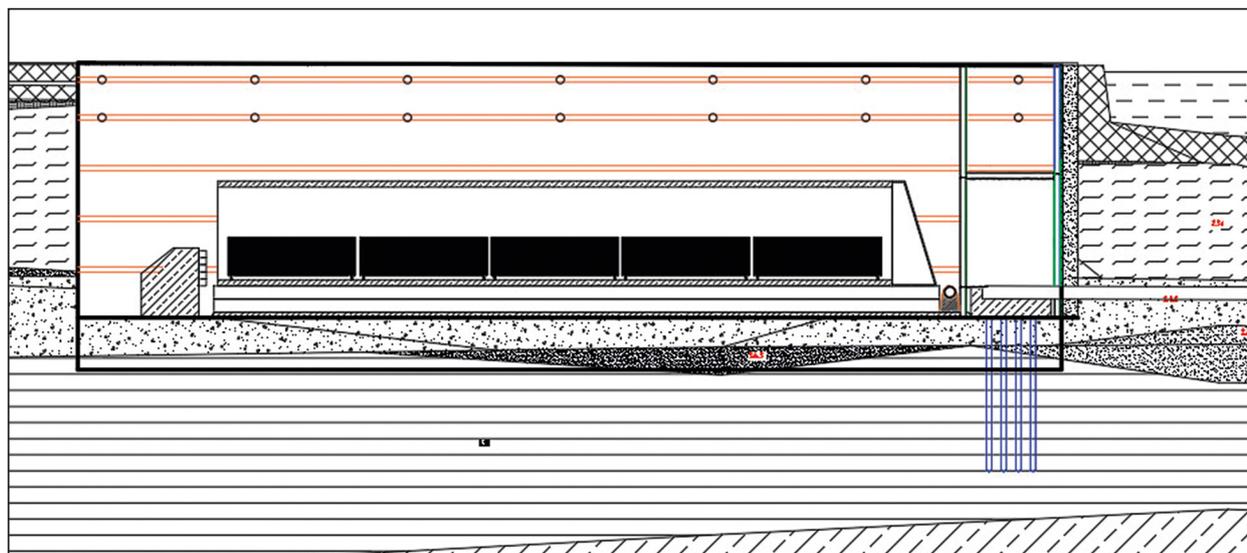


Рис. 3. Устройство котлована (этап 8)

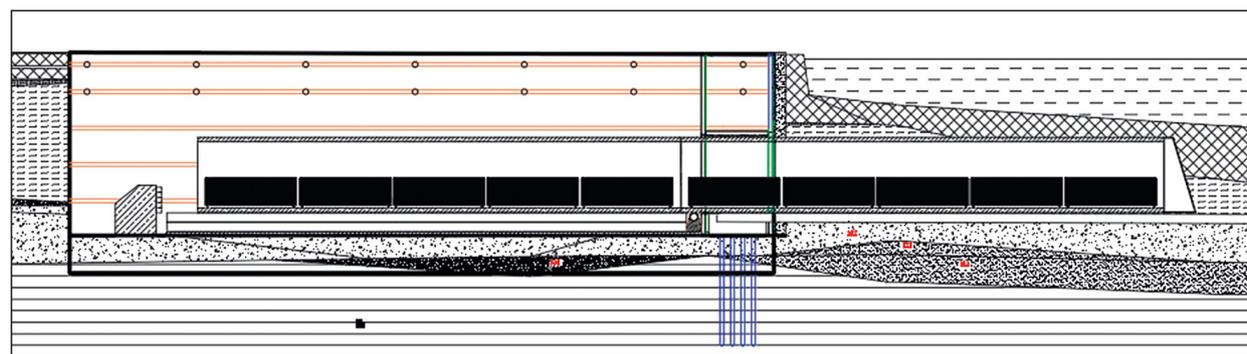


Рис. 4. Устройство деформационного шва (этап 9)

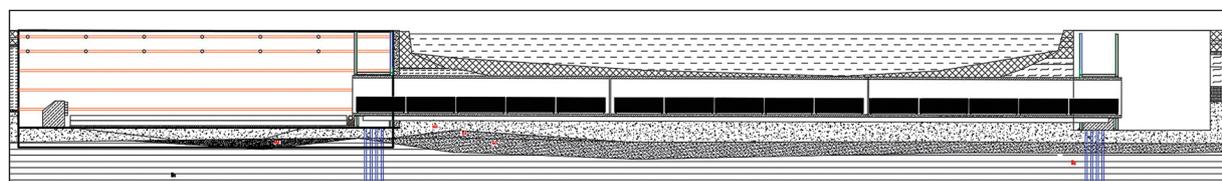


Рис. 5. Сооруженная подрусловая часть тоннеля (этап 10)

На десятом этапе повторяются процессы этапов 5, 8, 9, то есть происходят бетонирование третьей секции и ее подготовка (рис. 5). На противоположном правом берегу уже должна быть готова приемная камера, аналогичная

стартовой. После того как приемный котлован будет готов для приема первой секции, необходимо вести продавливание.

После установки подрусловой части тоннеля в проектное положение требуется

убрать балласт из сервисных отсеков, предварительно установив на тоннель бетонные плиты для увеличения отрицательной плавучести и обеспечения плотного прилегания тоннеля к трубам.

Результаты работы

Был выполнен сравнительный анализ существующих способов сооружения подводных тоннелей в условиях сложения дна водотока несвязанными илами. Все проанализированные способы требуют значительного заглубления тоннеля и применения специальных мер по укреплению грунта, что подчеркивает сложность и многообразие задач в области современного тоннелестроения.

Разработан новый способ строительства подводных городских тоннелей небольшой протяженности в сильно деформируемых несвязанных обводненных илистых грунтах. В поперечном сечении автодорожный тоннель в его подводной части представляет собой монолитную конструкцию с размерами секции 28,3 м шириной и 8,8 м высотой. Суммарная длина продавливаемых участков составляет 151 м.

Вывод

Разработанный способ сооружения подводных тоннелей небольшой длины в несвязанных илистых грунтах обеспечивает глубину заложения тоннеля 1,5–2 м, что приводит к его минимальной длине и делает этот способ конкурентоспособным по сравнению с другими способами строительства. Также при такой глубине заложения появляется больше возможностей вписать пересечения в уже сложившуюся транспортную сеть крупных городов и значительно расширить область строительства подводных тоннелей. Отсутствие специальных мер по укреплению

грунтов дна водотока существенно снижает трудоемкость этого способа и, соответственно, капитальные затраты.

Проведенное исследование подтверждает возможность использования предложенного способа, однако необходимо провести оценку напряженно-деформированного состояния системы «грунтовый массив — сооружение» по данным геотехнического расчета и разработать мероприятия по снижению лобового сопротивления и сопротивления по боковой поверхности конструкции при продавливании.

Библиографический список

1. Дудкин Е.П., Лосин Л.А., Мельник Я.В. Транспортные системы страны, ее регионов и городов. СПб.: ПГУПС, 2021. 54 с.
2. Маковский Л.В., Кравченко В.В. Подводные транспортные тоннели из опускных секций: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2016. С. 74–78.
3. Механизированная проходка тоннелей в городских условиях. Методология проектирования и управления строительством / В. Гульелмети [и др.]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 421–432; 467–476.
4. Чан Вай Лой. Обоснование конструктивно-технологических параметров при строительстве тоннелей методом продавливания в условиях Вьетнама: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2019. С. 44–49.
5. Фролов Ю.С., Сокорнов А.А. Сооружение тоннелей горным способом: учебное пособие. СПб., 2020. С. 4–18.
6. Сокорнов А.А., Коньков А.Н. Моделирование проходки тоннеля глубокого заложения в методе конечных элементов // Путевой навигатор. 2022. № 50(76). С. 36–44.
7. Транспортный переход через пролив Невельского — мост или тоннель? / Е. Б. Шестакова [и др.] // Путевой навигатор, 2019. № 39(65). С. 46–59.
8. Королько С.Н. Технологии и обеспечение безопасности ведения подземных работ при про-

ходке тоннелей на совмещенной дороге «Адлер — Горноклиматический курорт “Альпика-Сервис”» // Метро и тоннели. 2010. № 4. С. 30–33.

9. Курбацкий Е. Н., Синицын А. С. Конструктивно-технологические решения протяженных переходов через проливы, сложенные слабыми грунтами по дну на территориях расчлененных ландшафтов // Перспективы развития строительного комплекса. 2015. № 1. С. 248–254.

Дата поступления: 14.09.2024

Решение о публикации: 01.11.2024

Контактная информация:

МЕЛЬНИК Яна Владленовна — канд.

техн. наук, доцент;

melnik-yana@yandex.ru

ФЕДОРОВ Андрей Эдуардович — инженер;

rtut199922@mai.ru

Method of underwater urban tunnels construction in unrelated silty soils

Ia. V. Melnik¹, A. E. Fiodorov²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

² “SK “Mostotrest“ LLC, 10, Pravaya Naberezhnaya, Kaliningrad, 236006, Russia

For citation: Melnik Ia. V., Fiodorov A. E. Method of underwater urban tunnels construction in unrelated silty soils // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. Vol. 21, iss. 4. P. 965–972. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-04-965-972

Abstract

The purpose: to find a rational way to build an underwater tunnel in the dense urban development conditions, with the channel width of about 200 m, in unrelated silty soils, that will ensure the minimum depth of the tunnel without additional and expensive measures to strengthen the surrounding soil massive. The article considers the construction of road intersections at different levels, the construction of which has recently increased significantly due to the increase in the volume of highway construction as part of the urban transport network expansion. **Methods:** the article analyzes the existing methods of constructing urban underwater tunnels in weak soils, and reveals that none of them is rational under these conditions. A promising section of the Pregol River in Kaliningrad was chosen as the site of the study, the construction of a tunnel in this section will ensure not only an increase in the capacity of the highway, but also the passage of cargo flows. **Practical significance:** a technology has been developed for the phased construction of the subsurface part of underwater tunnels by pushing sections under the bottom of a watercourse without preliminary excavation, which has no analogues in the national tunneling industry.

Keywords: underwater urban tunnel, weak silty soils, pushing, immersed sections, operating element

References

1. Dudkin E.P., Losin L.A., Mel'nik Ya.V. Transportnye sistemy strany, ee regionov i gorodov. SPb.: PGUPS, 2021. 54 s.

2. Makovskij L. V., Kravchenko V. V. Podvodnye transportnye tonneli iz opusknyh sekcij: uchebnoe posobie. M.: KNORUS, 2016. S. 74–78.

3. Mekhanizirovannaya prohodka tonnelej v gorodskih usloviyah. Metodologiya proektirovaniya i upravleniya stroitel'stvom / V. Gul'elmetti [i dr.]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. S. 421–432; 467–476.

4. Chan Vaj Loj. Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov pri stroitel'stve tonnelej

metodom prodavlivaniya v usloviyah V'etnama: diss. ...
kand. tehn. nauk. M., 2019. S. 44–49.

5. Frolov Yu.S., Sokornov A.A. Sooruzhenie tonnelej gornym sposobom: uchebnoe posobie. SPb., 2020. S. 4–18.

6. Sokornov A.A., Kon'kov A.N. Modelirovanie prohodki tonnelya glubokogo zalozeniya v metode konechnyh elementov // Putevoj navigator. 2022. No. 50(76). S. 36–44.

7. Transportnyj perekhod cherez proliv Nevel'skogo — most ili tunnel'? / E. B. SHestakova [i dr.] // Putevoj navigator. 2019. № 39(65). S. 46–59.

8. Korol'ko S. N. Tekhnologii i obespechenie bezopasnosti vedeniya podzemnyh rabot pri prohodke tonnelej na sovmeshchennoj doroge “Adler —

Gornoklimaticheskij kurort “Al'pika-Servis” // Metro i tonneli. 2010. No. 4. S. 30–33.

9. Kurbackij E.N., Sinicyn A.S. Konstruktivno-tekhnologicheskie resheniya protyazhennyh perekhodov cherez prolivy, slozhennye slabymi gruntami po dnu na territoriyah raschlenennyh landshaftov // Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa. 2015. No. 1. S. 248–254.

Received: 14.09.2024

Accepted: 01.11.2024

Author's information:

Iana V. MELNIK — PhD, Associate Professor;
melnik-yana@yandex.ru

Andrey E. FIODOROV — engineer; rtut199922@mai.ru